

УДК 631.312.32

DOI: 10.15587/1729-4061.2019.169156

Розробка робочих органів ґрунтообробних знарядь з використанням методів біоніки

Г. В. Теслюк, С. П. Сокол, Б. А. Волик, Н. О. Пономаренко

В роботі наведена методика запозичення принципів будови тіла морських істот для розробки ґрунтообробних знарядь. Робота ґрунтообробних знарядь в умовах заниженої консолідації ґрунту вимагає саме покращення обтічності, тобто кришення і розпушення треба забезпечити не за рахунок підпірного різання, а за рахунок різання з ковзанням. За критерій раціональності конструкції прийнята величина тягового опору. Аналітична частина загальної методики дозволяє обчислити його величину. Новизна полягає в тому, що загальний тяговий опір розбитий на складові елементи, величина яких обчислюється окремо. Цей елемент є важливим бо дозволяє при розрахунках перейти до прямолінійних нескінченно малих ділянок периметра і окремо виконувати адаптацію складових ріжучого периметра до оброблюваного середовища.

Наведені елементи подібності біологічного аналогу і технічного прототипу: лобова частина (рильце) → долотоподібний наконечник розпушувача; бокові плавники → стрільчасті крила; вертикальний кильовий плавник → комкоподрібнювач. В результаті ідентифікації біологічного аналогу і технічного прототипу була отримана регресійна модель ріжучого периметра і робочої поверхні.

За результатами аналітичних досліджень запропонована математична модель взаємодії робочого органа з ґрунтом. Особливість аналітичної моделі взаємодії з ґрунтовим середовищем полягає в тому, що вона базується на умовах безпідпірного різання. Основні положення виконаних аналітичних досліджень підтверджені результатами модельних експериментальних досліджень, які показали зниження тягового опору у порівнянні з моделлю серійного робочого органа в середньому на 20 %. Такий результат можна отримати тільки за рахунок зменшення сил тертя, тобто покращенням обтічності робочої поверхні. Оригінальність отриманих наукових результатів полягає в повній адаптації робочих поверхонь біологічного аналогу до роботи в умовах ґрунтового середовища.

Ключові слова: обробіток ґрунту, робоча поверхня, тяговий опір, обтічність форми, методи біоніки, ґрунтообробні знаряддя

1. Вступ

Конструкція ґрунтообробних робочих органів визначається ґрунтовими умовами, в яких планується їх використання, і очікуваним результатом взаємодії якістю кришення і розпушення, а також тяговим опором. Розроблюваний робочий орган планується до використання в умовах ведення органічного землеробства.

Для органічного землеробства є характерною наявність у поверхневому шарі 0–15 см великої кількості рослинних решток, які ще не повністю пройшли стадію гуміфікації. Тому, поверхневий шар має слабу консолідацію і його механічні властивості суттєво відрізняються від більш глибоких горизонтів. Таким чином, існує диференціація шарів ґрунту за глибиною і ця диференціація має чіткі границі. Цей момент є важливим, бо від глибокорушувача розповсюджуються лінії сколу у повздовжно-вертикальній і поперечно-вертикальній площинах. Характер розповсюдження цих тріщин визначає кришення і розпушення оброблюваного середовища.

Органічне землеробство передбачає вертикальний обробіток ґрунту на глибину до 10 см, в той же час коренева система таких культур як кукурудза, соняшник, цукровий буряк потребує глибокого розпушення. Щорічне використання полицевих робочих органів не бажане, бо вони заорюють рослинні рештки на глибину обробітку і втрачається сенс самої системи землеробства. Тому чизельний обробіток є обов'язковим.

2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

В роботі [3] наведені результати аналітичних досліджень взаємодії з ґрунтом ріжучого периметра довільної геометричної форми. В основу досліджень покладено теорію внутрішньої напруги. Теорія дозволяє оцінити значення прогнозованого тягового опору. Але саме поняття ріжучого периметра не дозволяє деталізувати конструкцію, що робить не можливим її адаптацію до роботи в конкретному ґрунтовому середовищі. В роботі [4] недолік частково усунений шляхом переходу до нескінченно малих, але до інтегральної форми робочої поверхні висувається ряд вимог: повинна описуватись стандартними алгебраїчними рівняннями, тобто, стохастичні моделі не можуть бути використані. Це суттєво обмежує можливості адаптації робочого органу до ґрунтових умов. В роботі [2] запропонована математична модель, прив'язана до долотоподібного робочого органу, але на робочу поверхню накладене суттєве обмеження: модель – повинна бути прямолінійною. Модель, що запропонована в роботі [5], не враховує розгалуження ліній сколу, тому отримувані розрахункові значення тягового опору і кришення як правило занижені на 25–30 %. В роботі [6] наведені елементи математичної моделі розпушення ґрунту на основі об'ємної дії силового поля, що створює робочий орган. Але модель не може враховувати перепади кривизни поверхні при переході через нейтральне положення підпірної стінки. В роботі [7] розрахункова модель створена на основі побудови нерозривного замкненого робочого периметру знаряддя, тобто практично методом підгонки. В роботі [8] наведена модель направленої зносу робочої поверхні стрільчастої лапи. Це надає можливості формувати раціональну ріжучу поверхню, в тому числі і аргументовану на основі методів біоніки. Наведена методика може бути розповсюджена на робочі поверхні практично будь-якої форми. Таким чином робота [8] є найбільш наближеною по вирішуванім задачам.

Особливість сучасних технологій обробітку ґрунту полягає в прагненні звести до мінімуму механічну дію на оброблюване середовище. Такий підхід зберігає біологічну активність ґрунтового середовища, що сприяє підвищенню

врожайності вирощуваних культур [9]. Особливо чутливою до обробітку є кукурудза [10]. Особливість будови її кореневої системи полягає в тому, що вона вимагає розпушення ґрунту на велику глибину до 25 см. При цьому кришення повинно знаходитись в межах отримання максимально можливої кількості агрономічно цінних агрегатів, з приведеним діаметром 0,25–10 мм. Робочі органи підвищеної обтічності саме дозволяють мінімізувати механічну дію при збереженні потрібної якості кришення. Дещо схожі проблеми виникають і в процесі вирощування рису і пшениці [11], але глибина обробітку під ці культури менша, і складає 10–12 см.

Серед останніх суттєвих інновацій слід відмітити систему органічного землеробства. Особливість роботи за даною системою полягає в наступному. При традиційному обробітку ґрунту полицевими робочими органами (плугами) рослинні рештки попередника, або сідерата, заорюють на велику, до 25 см глибину. В системі органічного землеробства рослинні рештки занурюють робочими органами вертикальної дії (турбодисками) на глибину до 10–12 см. Наслідком є наявність в ґрунтовому середовищі великої кількості рослинних решток, які за зимовий період ще не повністю пройшли стадію гуміфікації, тобто кількість клейкої речовини зменшується. Це призводить до відповідного зменшення консолідації ґрунту, яка характеризується питомим зчепленням часток [12]. Виконаними дослідженнями підтверджене зменшення в умовах чорнозему степової зони України зменшення $C_{\text{пит}}$ з 2,5–3 кН/м² до 1,1–1,2 кН/м².

Сутність питання полягає в тому, що при грамотному використанні органічне землеробство дозволяє зменшити потребу у добривах неорганічного походження і частково відмовитись від засобів хімічного захисту. Як наслідок, отримується екологічно чиста продукція.

Наведений аналіз дозволяє стверджувати, що необхідно змінити підходи до розробки ґрунтообробних знарядь. Тому варіантом вирішення названих проблем може бути проектування ґрунтообробних робочих органів з залученням методів біоніки.

3. Мета та задачі дослідження

Метою досліджень є адаптація до середовища ґрунтообробного робочого органа, конструктивні параметри якого обґрунтовані на основі аналізу будови тіла біологічного аналога. Це надасть можливість покращити техніко-економічні показники виконання технологічного процесу обробітку ґрунту.

Задачі дослідження:

- встановлення елементів функціональної подібності;
- розробка геометричної, числової і регресійної моделі поверхні біологічного аналога;
- розробка математичної моделі взаємодії з ґрунтом робочої поверхні ґрунтообробного знаряддя;
- розробити діючий прототип і виконати його практичну апробацію.

4. Математична модель поверхні робочого органу

Порівняльний аналіз конструкцій глибокорозпушувачів і будови тіла морських тварин виявив, що в якості біологічного аналогу може бути використане тіло риби-молота [14].

За результатами візуального аналізу ряду фотографічних відбитків тіла біологічного аналогу у відповідності до базових критеріїв подібності, розроблена конструктивна схема долота чизеля (рис. 1).

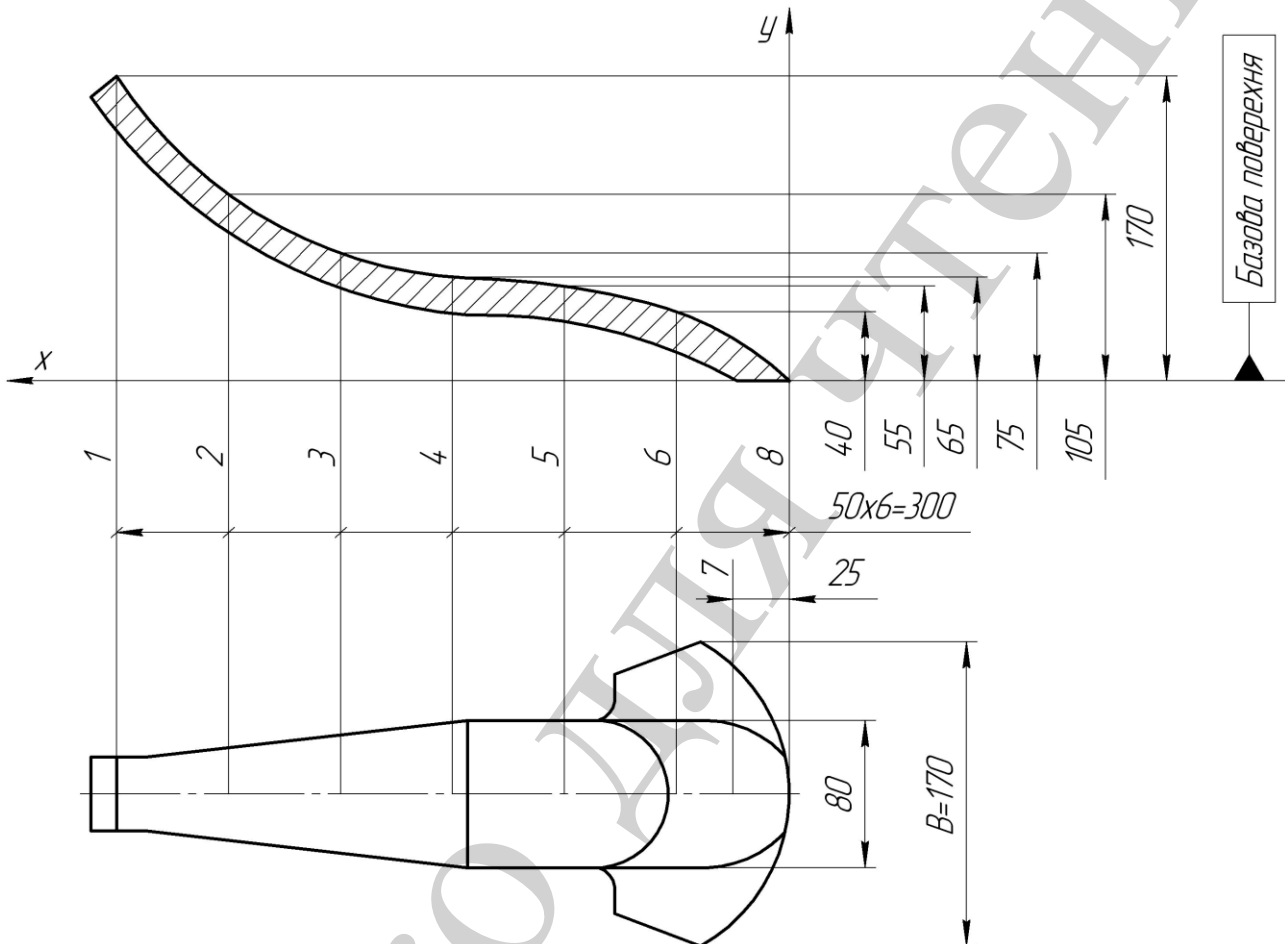


Рис. 1. Розрахункова схема до розробки регресійної моделі поверхні робочого органу

Математична модель може носити тільки регресійний характер. Чому саме так. Діло в тому, що рівняння повинні корегуватись у відповідності до розрахунків за аналітичною моделлю взаємодії леза з ґрунтом. Корегування відбувається чисельним методом, а рівняння регресії отримується саме таким способом. Вхідний параметр – координата X_i , або довжина тіла від носової частини до i -го перетину, вихідний параметр Y_i , або робоча ширина i -го перетину (рис. 1).

Розміри тіла біологічного аналогу на рис. 1 масштабовані до прийнятої ширини захвату 170 мм за результатами розмірного аналізу серії фотовідбитків реальної тварини і тому є умовними.

Отриманий чисельний масив (табл. 1) обробляємо у відповідності до методу найменших квадратів і отримуємо регресійне рівняння профілю поверхні.

Таблиця 1

Чисельна модель профілю поверхні біологічного аналогу

X, мм	Заміряне значення	1,0	50	100	150	200	250	300
Y, мм	Заміряне значення	1,0	40	55	65	75	105	170
	Розрахункове значення	0,88	39,85	56,32	63,35	75,11	105,82	169,9 2
Критерій Подібності		0,006	0,24	0,32	0,35	0,44	0,62	1,0

Кількість градацій коміркової сітки дорівнює 8. За результатами виконаних розрахунків [16], кубічне рівняння регресії має високі коефіцієнти кореляції, більше за 0,99, при збільшенні кількості градацій до 12 коефіцієнт кореляції підвищується не більше ніж на 0,002. Слід зауважити, що відсутня необхідність у повній відповідності профілю леза прототипа і аналогу. Тіла працюють у різних середовищах, тому потрібна тільки наближена залежність, яка потім, вже наступним етапом – на основі аналітичної моделі взаємодії з ґрунтом, адаптується до роботи саме в ґрунтовому середовищі. Таким чином обрана комірковість сітки є достатньою.

Модель буде адекватно копіювати аналог тільки в тому разі, якщо вона побудована у відповідності до критеріїв подібності. Для отримання геометричної моделі достатньо використати тривіальні критерії, які являють собою співвідношення двох базових розмірів. Для даного рівня моделювання тривіальний критерій подібності.

$$K_{\text{пт}} = \frac{B}{Y_i}, \quad (1)$$

де B – конструктивна ширина захвату робочого органу; Y_i – ширина аналогу в i -тому перетині.

Для отримання розрахункової схеми необхідно використовувати інтегральний критерій подібності, який отриманий методом аналізу розмірностей аналітичної моделі взаємодії з ґрунтом різального периметра довільної геометричної форми [4],

$$\left(\frac{C_{\text{пт}} \cdot P_{\Gamma} \cdot b}{\gamma_{\Gamma} \cdot V^2 \cdot P_B \cdot a} \right)_H^n = \left(\frac{C_{\text{пт}} \cdot P_{\Gamma} \cdot b}{\gamma_{\Gamma} \cdot V^2 \cdot P_B \cdot a} \right)_M^m = K_{\text{п}}, \quad (2)$$

де $C_{\text{пит}}$ – питоме зчеплення часток ґрунту; $\gamma_{\text{Г}}$ – питома вага ґрунту; V – робоча швидкість ґрунтообробного знаряддя чого; $P_{\text{Г}}$ – горизонтальна складова тягового опору робочого органу; $P_{\text{В}}$ – вертикальна складова тягового опору; B – приведена ширина захвату робочого органу[4]; a – глибина робочого ходу ґрунтообробного знаряддя.

У результаті розрахунку знайдене кубічне рівнянь регресії (3).

$$Y = -0,00001892X^3 - 0,007564X^2 + 1,1328X - 0,2377. \quad (3)$$

Коефіцієнт кореляції $K_k = 0,9995$; коефіцієнт детермінації $K_d = 0,999$; систематична похибка $\Pi = 4,9 \%$.

У розрахунковій схемі як базовий конструктивний елемент приймаємо ширину захвату $B = 170$ мм і відповідно до другої теореми подібності рівняння (3) представляємо у вигляді критеріального рівняння, яке в подальшому і приймаємо як робоче.

$$K_{\Pi} = (0,11X^3 - 43,74X^2 + 0,6446X + 3515)10^{-6}. \quad (4)$$

Сутність полягає в тому, що при переході до проектування реального знаряддя достатньо прийняти розмір базового елемента, тобто його ширину захвату і відповідно до критеріального рівняння побудувати робочу поверхню в цілому.

5. Математична модель взаємодії з ґрунтом розробленого робочого органу

Існує модель [4], що дозволяє обчислити прогнозований тяговий опір знаряддя, але прив'язана до групи знарядь конкретної геометричної форми і розповсюдити методики на довільну геометричну форму не уявляється можливим.

В методиці, що пропонується, за основу прийнята теорія внутрішньої напруги [3], яка в свою чергу є розвитком досліджень [1].

Сутність моделі полягає в наступному. Процес взаємодії робочого органа довільної геометричної форми розбитий на два етапи:

- ріжучий периметр знаряддя відділяє від загального масиву призму ґрунту;

- подальше кришення сколотої призми відбувається за рахунок подолання робочими поверхнями знаряддя внутрішньої напруги, яка попередньо існує в консолідованому ґрунті.

Таким чином, вводяться два поняття:

- ріжучий периметр як проекція всіх ріжучих кромek знаряддя на площину, що перпендикулярна напрямку руху [1];

- внутрішня напруга, яка визначається як векторна сума всіх діючих в середовищі сил зчеплення від молекулярного до агрегатного рівня [4].

Робочий орган розглядається як геометрична сума поверхонь, певним чином зорієнтованих у просторі.

Тяговий опір різального периметра умовно розбитий на такі складові: $P_{СК}$ – сила сколу призми ґрунту лобовою частиною; P_T – сила тиску ґрунту на робочі поверхні; $P_{ТР}$ – сили тертя ґрунту об робочі поверхні; P_d – динамічна складова сили опору.

Далі визначаємо аналітично доведені до робочого органа сили.

5. 1. Сила сколу призми ґрунту лобовою частиною

Скол призми ґрунту відбувається від ріжучої кромки долота. Інші елементи робочої поверхні, в тому числі і крила, в сколі участі не приймають, бо лінії сколу перекривають їх ширину захвату.

Методика визначення сили сколу відпрацьована в дослідженнях [3, 6, 15].

Сутність методики полягає в тому, що профіль леза робочого органу поділяється на нескінченно малі ділянки, від яких розповсюджуються лінії сколу, що утворюють призму.

Сила сколу призми визначається за формулою

$$P_{СК} = C_{ПІТ} F_{СК}, \quad (5)$$

де $F_{СК}$ – сумарна площа сколу.

Таким чином сутність визначення сили полягає у визначенні площі сколу, призми [4].

5. 2. Сила тиску і тертя ґрунту на робочі поверхні

Для розробленого знаряддя необхідно окремо розглядати поверхню долота і поверхні крил. Для обох складових за рекомендаціями [3] може бути застосоване рівняння підпірної стінки [6].

Для позитивного кута β нахилу стінки тиск по нормалі до поверхні E_a визначається за формулою [13]

$$E_a = \frac{\gamma \cdot H^2}{2} \cdot \left[\operatorname{tg} \left(45 - \frac{\varphi + \beta}{2} \right) + \operatorname{tg} \beta \right]^2 \cdot \cos \beta, \quad (6)$$

де γ – питома вага ґрунту; H – глибина занурення стінки; β – кут нахилу стінки до вертикалі; φ – кут внутрішнього тертя.

Розглянемо розрахункову схему (рис. 2) відносно розробленого ґрунтообробного знаряддя. Помістимо початок координат у носок долота.

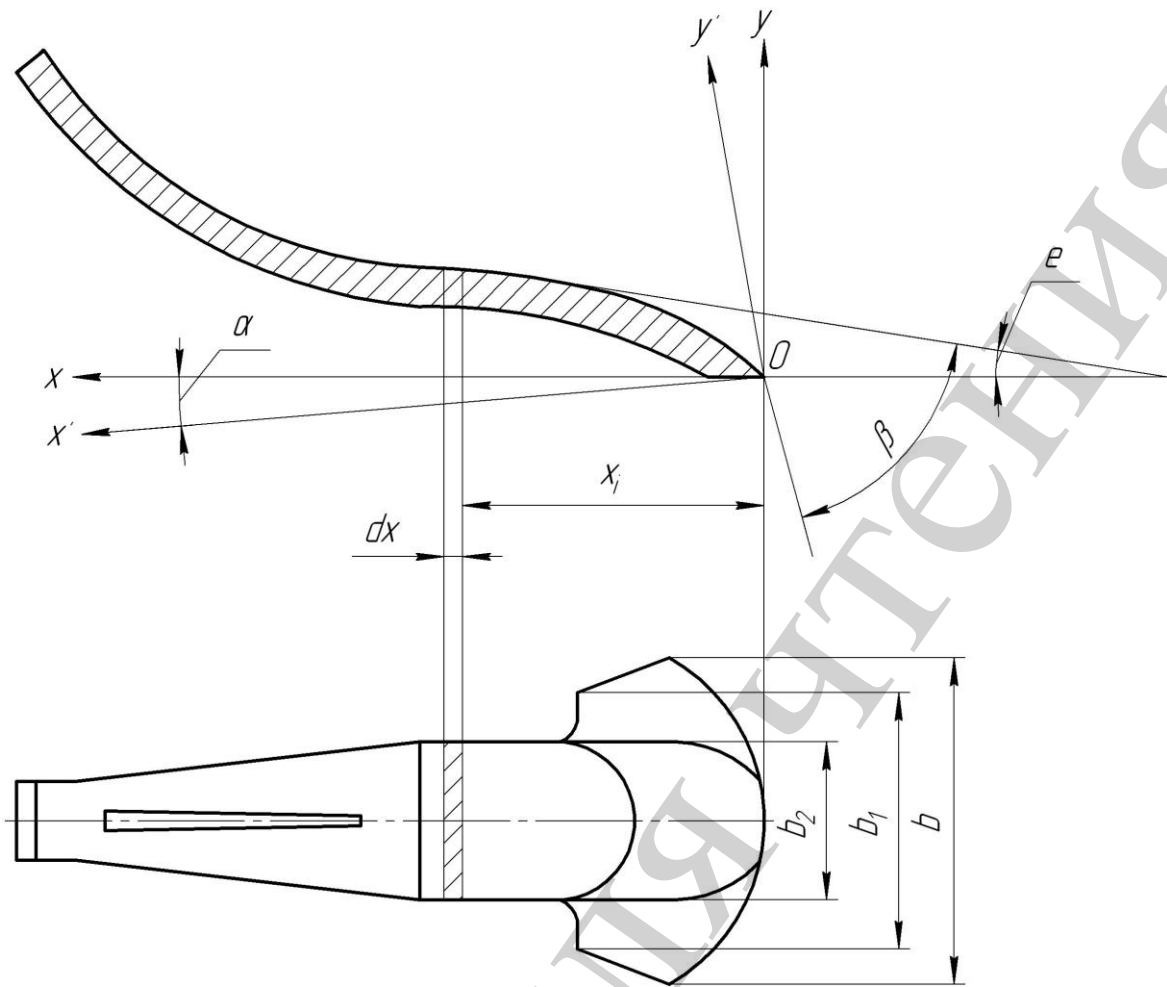


Рис. 2. Розрахункова схема до визначення тиску ґрунту на робочі поверхні знаряддя: α – кут атаки

Регресійне рівняння поверхні (3) отримане в координатах XOY . Представимо поверхню долота як суму нескінченно малих ділянок dx . Такі ділянки можна вважати плоскими з кутами постановки до вертикалі і напрямку руху.

В координатах XOY тангенс кута ϵ нахилу ділянки до дна борозни буде становити перший похідний в точці X_i :

$$\epsilon = \arctg(dY / dX). \quad (7)$$

Але робочий орган встановлений під кутом атаки α до дна борозни. Повернемо осі координат на кут α – кут атаки робочого органу в цілому і отримаємо нову систему координат $X'OY'$ в якій вісь X' співпадає з напрямком руху долота.

Тоді кут постановки елементарної ділянки до вертикалі в рухомій системі координат

$$\beta = 0,5\pi - \epsilon - \alpha. \quad (8)$$

Визначимо діючу силу на довільно взяту ділянку, розташовану на відстані X_i від носка

$$dP_T = \frac{\gamma \cdot Y_i^2 \cdot b_2}{2} \cdot \left[\operatorname{tg} \left(45 - \frac{\varphi + \beta}{2} \right) + \operatorname{tg} \beta \right]^{-2} \cdot \cos \beta \cdot dx. \quad (9)$$

Загальна реакція поверхні

$$P_T = \int_{x=0}^{x=L} \frac{\gamma \cdot Y_i^2 \cdot b_2}{2} \cdot \left[\operatorname{tg} \left(45 - \frac{\varphi + \beta}{2} \right) + \operatorname{tg} \beta \right]^{-2} \cdot \cos \beta \cdot dx, \quad (10)$$

$$P_{TP} = P_T \operatorname{tg} \varphi, \quad (11)$$

де L – загальна довжина робочої ділянки; φ – кут зовнішнього тертя ґрунту по сталі.

Миттєвий напрямок дії сили P_T – нормаль до профілю поверхні; сила P_{TP} – по дотичній до профілю. Знання прогнозованого значення сил $P_{СК}$, P_T , P_{TP} у відповідності до теорії внутрішньої напруги [3] є необхідна і достатня умова до проектного розрахунку ступеня кришення ґрунту знаряддям.

6. Результати досліджень моделі експериментального зразка ґрунтообробного знаряддя

Експериментальні дослідження виконані в умовах ґрунтового каналу $50 \times 500 \times 7000$ мм, який заповнювався модельним середовищем (рис. 3). Модельне середовище являло собою суміш піска різного фракційного складу. Механіко-технологічні властивості оцінювались за питомим зчепленням часток, яке було прийняте в якості інтегрального показника [12].



Рис. 3. Робочий момент досліджень у ґрунтовому каналі

Особливість конструкції каналу полягає в тому що стояк досліджуваного робочого органу зафіксований на візку двома пружинами, що дозволяє виконувати заміри як повздовжньої так і поперечної складових сили тягового опору. Складові тягового опору заміряли за допомогою тензоланцюга за загальновідомими методиками.

Для експерименту на 3D принтері були роздруковані експериментальний і серійний глибокорозпушувачі з масштабним коефіцієнтом М1:2. Експериментальні дослідження підтвердили вірність вибору біологічного аналогу і концепції досліджень в цілому. За критерій раціональності було прийняте заміряне значення тягового опору експериментального і серійного глибокорозпушувачів. Моделі були виконані з пластичної маси, тобто коефіцієнти зовнішнього тертя не відповідали реальним умовам, але моделювання взаємодії було проведене у повній відповідності до критеріїв подібності [1], тобто вони легко перераховуються. Результати досліджень представлені в табл. 2. Методики визначення властивостей ґрунту наведені в [12].

Таблиця 2

Результати досліджень тягового опору моделей

Варіант моделі глибокорозпушувача	C , кН/м ²	V , м/с	P , Н (заміряне значення)	P , Н (розраховане значення)
Дослідний зразок	1,05	0,35	120	138
	1,3	0,36	136	144
Серійна	1,05	0,35	155	163
	1,3	0,36	170	181

Примітки: C – питоме зчеплення часток ґрунту; V – робоча швидкість; P – тяговий опір

Аналіз даних таблиці показує, що розроблена модель глибокорозпушувача забезпечує зменшення абсолютного значення тягового опору в межах 20 %, і покращення структурності обробленого ґрунту до 7 %. У відповідності до теорії подібності можна стверджувати, що і для натурного зразка робочого органу наведена тенденція збережеться.

7. Обговорення результатів дослідження взаємодії з ґрунтом дослідного зразка глибокорозпушувача

Зниження тягового опору моделі експериментального зразка робочого органу у порівнянні з серійною моделлю пояснюється кращою обтічністю ґрунтом робочих поверхонь. Як результат, зменшення сил тиску і тертя. Позитивний ефект полягає в тому, що це зменшує загальний тяговий опір агрегату і, як наслідок витрати пального. Прогнозується також підвищення продуктивності за рахунок можливості підвищення робочої швидкості. Але це питання потребує досліджень припустимості підвищення швидкості з точки зору дотримання агротехніки виконання робіт.

Аналіз даних табл. 2. показує що розраховані значення перевищують в середньому на 5–7 % отримані експериментально. Це можна пояснити

окремими припущеннями, прийнятими в моделі, наприклад введенням інтегрального показника механіко-технологічних властивостей [4]. Якість кришення оцінювали за коефіцієнтом структурності, який визначався як відношення маси агрономічно цінних агрегатів до загальної маси взятої проби. Для серійної лапи цей показник становить 0,57–0,62 для розробленої 0,65–0,75.

В якості недоліків слід відмітити, що отримана таким чином форма поверхні робочого органу складна і буде змінюватись під дією абразивного зносу, що буде зменшувати ефективність конструкції. Але в умовах багатосерійного виробництва проблема форми легко вирішується. Абразивний знос можна звести до мінімуму шляхом цементації поверхні, або нанесенням зносостійкого покриття. Слід відмітити, що в даній роботі вирішена проблема основного, тобто глибокого обробітку ґрунту, який виконується восени. Що стосується поверхневого, весняного обробітку, то за умови збереження основних принципів і обґрунтування відповідного біологічного аналогу, методика може бути розповсюджена і на знаряддя поверхневого обробітку.

Щодо подальшого розвитку досліджень, треба сказати наступне. По-перше, перспективним є узагальнення методики для всієї групи морських тварин. По-друге, треба розповсюдити методику на землерийні тварини. По-третє, треба узагальнити методику експериментальних досліджень, спрямованих на адаптацію знарядь до ґрунтових умов.

8. Висновки

1. Візуальним аналізом будови тіла найбільш поширених різновидів морських тварин встановлено, що будова тіла риби-молота функціонально найбільш відповідає будові глибокорозпушувача чизельного типу і тому рибамолот може бути прийнята у якості біологічного аналогу. Елементи ідентифікації: тіло аналогу → стояк; вертикальний плавник → комкоподрібнювач; бокові плавники–леза-бритви.

2. Геометрична модель робочого органу відповідає площі змочуваної поверхні аналогу. Регресійна модель ріжучого периметра: $Y=0,00001892X^3-0,007564X^2+1,1328X-0,2377$, де Y – поперечна, X – повздовжня координати.

3. Розроблена аналітична модель взаємодії з ґрунтовим середовищем робочого органу підвищеної обтічності. Основні відмінності моделі полягають в представленні ріжучого периметра робочого органу як сукупності нескінченно малих прямолінійних ділянок, визначенні реакції ґрунту на дію цих ділянок і наступним інтегруванням по реальному профілю ріжучого периметра.

4. Розроблена на основі моделі реальна конструкція глибокорозпушувача. Основна відмінність від прототипу полягає у відмові від прямолінійності робочих ділянок і переході до профілів, отриманих на основі регресійного аналізу тіла морської тварини. Виконані модельні дослідження у ґрунтовому каналі підтверджують, що конструкція дозволяє знизити загальний тяговий опір при роботі в ґрунтових умовах модельного середовища до 20 % у порівнянні з прототипом.

Література

1. Ветров Ю. А. Резание грунтов землеройными машинами: монография. М.: Машиностроение, 1971. 357 с.
2. Ветохін В. І., Гетьман О. Г., Білицька Н. В. До питання формоутворення робочої поверхні з урахуванням явища обміна об'ємом між робочим органом і ґрунтом // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. 2011. Т. 51, Вип. 4. С. 87–94.
3. Моделювання якості розпушення ґрунту долотом / Кобець О., Теслюк Г., Волик Б., Лепеть Є. // Техніка і технології АПК. 2015. № 6. С. 31–33.
4. Панченко А. Н. Теория измельчения почв почвообрабатывающими орудиями. Днепропетровск: ДГАУ, 1999. 140 с.
5. Кобець А. С., Волик Б. А., Пугач А. М. Ґрунтообробні машини: теорія, конструкція, розрахунок: монографія. Дніпропетровськ: Свідлер А. Л., 2011. 140 с.
6. Семенюта А. М., Білокопитов О. В., Волик Б. А. Методика розрахунку загальної реакції різання ґрунту поверхнею довільної геометричної форми // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. 2010. Т. 2, Вип. 10. С. 161–167.
7. Чуйко И. С., Волик Б. А., Колбасин В. А. Обоснование конструктивных параметров V- образного орудия для чизелевания почвы // Проблемы та перспективи розвитку аграрної механіки. Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. Дніпропетровськ: ДДАУ, 2004. С. 29–33.
8. Kobets A. S., Pugach A. M., Kharytonov M. M. Justification of the cultivator sweep and strengthening elements on the working surface // INMATEG Agricultural Engineering. 2018. Vol. 54, Issue 1. P. 161–170.
9. Conservation tillage impacts on soil, crop and the environment / Busari M. A., Kukal S. S., Kaur A., Bhatt R., Dulazi A. A. // International Soil and Water Conservation Research. 2015. Vol. 3, Issue 2. P. 119–129. doi: <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2015.05.002>
10. Rotary zone tillage improves corn establishment in a kura clover living mulch / Dobbratz M., Baker J. M., Grossman J., Wells M. S., Ginakes P. // Soil and Tillage Research. 2019. Vol. 189. P. 229–235. doi: <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.02.007>
11. Sustainability issues on rice–wheat cropping system / Bhatt R., Kukal S. S., Busari M. A., Arora S., Yadav M. // International Soil and Water Conservation Research. 2016. Vol. 4, Issue 1. P. 64–74. doi: <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2015.12.001>
12. Механіко-технологічні властивості сільськогосподарських матеріалів: навч. пос. / Кобець А. С., Іщенко Т. Д., Волик Б. А., Демидов О. А. Дніпропетровськ: РВВ ДДАУ, 2009. 84 с.
13. Цытович Н. А. Механика грунтов (краткий курс): учеб. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1983. 288 с.
14. Аналіз будови тіла морських тварин на можливість прийняття її за біологічний аналог ґрунтообробних робочих органів / Волик Б., Теслюк Г., Зо-

лотовська О., Майстришин Р. // Техніка і технології в АПК: науково-виробничий журнал. 2018. Вип. 5 (104). С. 7–9.

15. Теслюк Г. В., Волик Б. А., Майстришин Р. М. Удосконалення технологічних процесів і технічних засобів обробітку ґрунту в системі органічного землеробства // Інженерія природокористування. 2016. № 1. С. 48–52.

16. Аппроксимация функции одной переменной. URL: <https://planetcalc.ru/5992/>